

面向智能仓储的多机器人任务分配及路径规划

褚晶¹, 田艺秋¹, 岳颀¹, 黄勇²

(1.西安邮电大学 自动化学院, 陕西 西安 710121; 2.西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要:面对当今日益复杂的市场需求,传统的人工仓储系统已力不从心,仓储系统的智能化转型升级成为迫切需求。在这一背景下,针对仓储环境设计了一种仓储多机器人系统的任务分配与路径规划策略,以实现混杂单机与多机编队仓储任务的高效完成。文中提出一种将交通流量影响因子融入拍卖算法的仓储任务分配策略,通过预测环境中各区域机器人密度,实现任务分配的优化。该研究为多机编队任务设计了基于虚拟结构法的三机器人编队模型,并提出一种2层路径规划策略:外层基于Floyd算法进行全局路径规划,内层通过交通规则约束解决各类碰撞问题,实现局部路径规划。在MATLAB平台对设计的仓储多机器人系统进行仿真实验,实验结果表明,该多机器人系统能够灵活处理混杂2种类型的仓储任务,有效减少机器人之间的碰撞风险和机器人在密集区域的停滞现象,从而提高系统的安全性和工作效率。该研究为未来多机器人系统研究和现实应用提供参考。

关键词:仓储系统;多机器人系统;任务分配;路径规划;多机器人协同

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)05-0929-10

在现代仓储物流行业中,自动化和智能化已成为提高效率 and 降低成本的关键途径。机器人系统(multi-robot systems, MRS)因其高灵活性和高效率,广泛应用于仓储物流领域。然而仓储环境具有通道狭窄、障碍物多、存在动态变化等特点,需完成的仓储任务具有数量多、多样化等特点,其中任务多样性主要表现在货物的取货地点、送货地点以及尺寸大小各不相同。如何在复杂的仓储环境中实现多机器人协同工作,避免碰撞,优化任务分配和路径规划,仍是一个具有挑战性的研究课题。

目前大多文献在为多机器人任务分配时未充分考虑仓储任务的多样性。单个机器人无法完成较大货物的搬运工作,为完成该任务,可以选用多机器人协同编队的方法^[1]。基于此,本研究将针对混杂单机器人与多机器人仓储任务,综合考虑任务分配与路径规划,提出一种高效率、高灵活性的仓储多机器人系统设计方案。引入交通流量预测对传统拍卖算

法进行改进,优化任务分配,减少仓储环境内机器人交通阻塞现象,以期实现系统效率的提升。针对路径规划问题,采用Floyd算法结合交通规则进行优化,降低机器人碰撞风险,提高系统安全性和稳定性。此外,将虚拟结构编队技术引入仓储多机器人系统设计,使得系统能够处理混杂单机与多机编队仓储任务。在MATLAB平台进行仿真实验,验证本研究所设计算法的有效性和可行性。

1 相关工作

1.1 仓储多机器人系统

基于多机器人协作设计的仓储多机器人系统,可令多个机器人共同协作完成仓储任务,该系统具有高灵活性、高效率 and 低成本等优点。Jose等^[2]为3个机器人在基于仓储环境的共同工作空间中的任务分配和无碰撞路径规划提出了一种启发式方法。国内外涌现出了一些专注于智能仓储的企业,亚马逊基于Kiva机器人构建的无人仓库系统为最具代表性的案例^[3-4]。该系统利用仓储式移动机器人,实现了从“人到货”到“货到人”的分拣和选取方式的转变,实现了无人化的仓储作业^[5]。同时,国内

收稿日期:2023-12-01

基金项目:国家自然科学基金(61703336)与陕西省自然科学基金(2023-JC-QN-0727)资助

作者简介:褚晶(1989—),讲师

通信作者:褚晶(1989—) e-mail:jchu@xupt.edu.cn

也不断涌现了一些致力于多机器人系统的智能仓储企业,例如快仓、海康等。这些企业通过运用多机器人系统,不但提高了仓储效率,还降低了人力成本,取得了显著的经济效益。而高效的仓储系统依赖着多机器人的任务分配和路径规划技术。

1.2 多机器人系统中的任务分配

任务分配旨在有效地将任务分配给适当的机器人,以实现整体系统的高效运作。多机器人任务分配(multi-robot task allocation, MRTA)可根据机器人同时完成任务数量,划分为单任务机器人(single-task, ST)与多任务机器人(multi-task, MT),也可根据任务所需机器人数量,划分为单机器人任务(single-robot, SR)与多机器人任务(multi-robot, MR)^[6]。目前主流的任务分配算法主要分为市场机制分配法^[7]、群体智能启发式算法^[8]以及基于深度学习的任务分配算法^[9]等几种。Sullivan 等^[10]引入了新的拍卖竞价和解析算法解决单物品拍卖问题,并将能源消耗和完成任务总时间作为指标。

1.3 多机器人系统中的路径规划

路径规划主要是指机器人在区域内自动规划一条从指定起点到指定终点的路径,且该路径可满足机器人的安全需求和成本需求。多机器人路径规划问题属于 NP-hard 问题^[11]。常用的路径规划算法有 Dijkstra 算法^[12]、RRT 算法^[13]、Floyd 算法等。王靖东^[14]提出了一种改进的 Floyd 算法,通过优化路径选择策略,提高了多机器人系统的路径规划效率。

1.4 多机器人编队技术

多机器人编队控制基本原理是对群体进行行为控制,即控制多个智能体群体的几何形态。在仓储环境下,多机器人编队控制可令多机器人在维持一定队形的行进过程中,安全地避开可能的障碍,从而完成任务。为解决订单中存在的大尺寸货物搬运困难问题,本研究选择将多机器人协同编队技术引入多机器人系统的设计,从而提升单机与多机完成复杂任务的能力。近年来,控制界对多移动机器人编队控制进行了大量的研究^[15]。经常使用的编队方法有虚拟结构编队、leader-follower 编队^[16]、基于行为编队^[17]等。虚拟结构编队最早由 Tan 提出,通过将队形视作刚性结构,实现队形的形成与保持^[18]。

2 任务分配策略设计

在仓储多机器人系统中,合理的任务分配策略

是实现该系统高效工作的关键^[19]。

2.1 单一任务的分配策略

多机器人的任务分配问题可视为最优分配问题。该问题是指如何将多个机器人在约束条件下分配给一组任务,使得完成任务的方式最优,即最大限度地提高系统完成任务的效率。使用拍卖算法可解决多机器人的任务分配问题。该算法基本思想是模拟现实经济市场中的拍卖竞拍过程,机器人作为竞拍者对需要分配的任务进行竞价,根据各机器人的出价高低分配该任务。拍卖算法在任务分配中的具体实现步骤如下:

step1 初始化 将任务视为拍卖对象,机器人视为竞标者。任务分配中心依据任务优先级发布当前需分配的任务。

step2 竞价 机器人根据自身状态与任务要求出价。

step3 选择 确定该任务最高出价者,将该任务分配给出价最高的机器人。

step4 结束 对未被分配的任务循环该拍卖过程,当所有任务都被分配,结束拍卖过程,完成任务分配。

2.2 仓储环境下的多任务分配策略

本研究以仓储任务为拍卖对象,以机器人为竞标者,以出价成本最低的机器人为中标者。令每个仓储任务根据其在任务组中的先后顺序进行招标。每轮竞标中,所有机器人都会为该任务进行出价。在选择阶段,优先选择出价成本低的机器人。每个机器人拥有一个已分配任务序列,在每轮竞标结束后,更新机器人任务序列和任务集。图 1 为拍卖算法流程图。

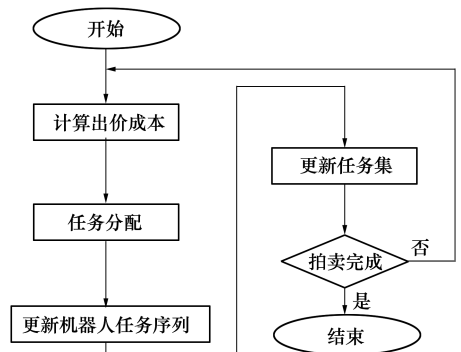


图 1 拍卖算法流程图

由于需要系统高效完成仓储任务,各机器人对任务的出价成本与任务完成时间正相关。并且在计

算新任务成本时,机器人 R_i 的任务序列中可能存在还未完成的任务。因此可对机器人 R_i 的投标成本 B_i 进行公式化表示。

$$B_i = \alpha \times T_{t,i} + \beta \times T_{d,i} \quad (1)$$

式中: $T_{t,i}$ 表示机器人 R_i 完成任务序列中所有任务的总时间; $T_{d,i}$ 表示机器人 R_i 完成任务序列中所有任务的运动时间; α 表示机器人完成任务总时间对竞价成本的影响度; β 表示机器人运动时间与工作时间的相对重要性。另外,机器人完成任务过程包括机器人前往目标点的运动过程以及机器人在任务点的工作过程。由 $T_{w,i}$ 表示机器人 R_i 在任务序列中所有任务点的工作时间,可将机器人 R_i 完成所有任务的总时间 $T_{t,i}$ 表示为

$$T_{t,i} = T_{d,i} + T_{w,i} \quad (2)$$

将机器人在该环境中的运动速度表示为 v , 在每个任务点的工作时间表示为 t_w 。机器人 R_i 完成任务序列中所有任务的运动路径长度表示为 $S_{d,i}$, 其任务序列中所有任务的总任务点总个数为 $n_{c,i}$, 则可得以下公式

$$\begin{aligned} T_{d,i} &= S_{d,i}/v \\ T_{w,i} &= n_{c,i} \times t_w \end{aligned} \quad (3)$$

当需要编队协同完成的任务作为拍卖对象时,系统需要组成编队机器人的总成本最小化。因此,在上述算法的框架下,对于需要多机器人协同完成的任务,系统会分配给总成本最低的3个机器人。具体步骤为:首先根据上述算法为该任务找到成本最低的机器人,再使用该算法找到到达第一个任务点成本最低的另外2个机器人,以确保成本最小化同时实现编队协同作业。

另外,根据公式(3)可知,机器人执行任务的成本计算需要基于其全局路径规划的结果,后文将详细讨论路径规划策略的设计。

2.3 考虑交通流量预测的任务分配策略

仓储环境下的多机器人系统需要高效完成复杂的搬运任务。然而,在一定空间中使用较多数量的机器人时,仓储环境中的某些区域可能由于多个机器人集中,使得机器人密度过大,引起交通拥堵或死锁问题。针对该问题,本研究考虑区域内机器人流量,在拍卖算法中引入交通流量影响因子,可以更准确地评估机器人执行任务的实际成本。

因此,将交通流量影响因子 x_i 加入机器人 R_i 的成本计算,可更新其投标成本计算为

$$B_i = \alpha \times T_{t,i} + \beta \times T_{d,i} + x_i \quad (4)$$

本研究将机器人 R_i 途径各区域的交通流量 F_i 作为影响竞价成本的因素,令 ζ 表示区域交通流量对竞价成本的影响度,则该机器人对应交通流量影响因子 x_i 可表示为

$$x_i = \zeta \times F_i \quad (5)$$

将仓储环境划分为 m 个区域,令 S_p 表示区域 a_p 的面积。得到机器人 R_i 完成该任务的路径后,从路径中每隔 h 取一个路径点,可得到机器人 R_i 位于所取路径点时,当前所在区域 a_p 的机器人数量为 $N_p^1(i), N_p^2(i), N_p^3(i), \dots$ 。则可计算该机器人经过该区域时交通流量的峰值 $N_{p,\max}(i)$ 为

$$N_{p,\max}(i) = \max(N_p^1(i), N_p^2(i), N_p^3(i), \dots) \quad (6)$$

则机器人 R_i 经过区域 a_p 峰值密度为

$$\rho_p(i) = N_{p,\max}(i)/S_p \quad (7)$$

机器人 R_i 路径区域的流量可表示为

$$F_i = \sum_{p=1}^m \rho_p(i) \quad (8)$$

3 路径规划策略设计

在解决多机器人的路径规划问题时,除了考虑机器人与环境中静态障碍物的碰撞问题,还需考虑机器人之间的相互碰撞问题。因此,本节针对仓储多机器人系统提出一种2层路径规划策略,外层负责全局路径规划,内层负责局部路径规划,以确保多机器人高效、安全地协同完成仓储任务。另外,针对混合多机器人协同搬运任务的需求,本节基于虚拟结构法进行编队建模。

3.1 考虑多机器人协同搬运的全局路径规划

在全局路径规划算法中,Floyd算法能够计算给定加权图中任意点之间的最短路径。相比于只能计算给定图中单源最短路径的Dijkstra算法,该算法不需要对每个节点进行单独计算^[20]。另外,PRM算法、RRT算法等基于采样的路径规划算法,性能依赖于采样密度等参数的选择,大型仓储环境中的采样点较多,计算量较大。Floyd算法基于图论进行路径规划,可以保证全局最优性和较高的环境适应度。此外,本文研究环境为仓储环境,该环境中货架和通道固定,不需不断更新算法。因此本文采用的Floyd算法的计算复杂度不影响任务分配过程。

该算法应用邻接矩阵 G 、距离矩阵 D 和路径矩阵 P ,为机器人规划最优路径。矩阵 G 表示图中各节点之间的直接连接关系;矩阵 D 表示节点之间的

最短路径距离;矩阵 P 存储各节点之间最优路径的前驱节点。本研究中 Floyd 算法的基本步骤如下:

step1 初始化邻接矩阵 G :在本研究中根据所设置的仓储环境对该矩阵进行初始化。

step2 初始化距离矩阵 D 和路径矩阵 P :遍历矩阵 G ,并将矩阵 G 中的值复制到对应位置的矩阵 D 中。同时,将矩阵 P 中的元素初始化为 -1 。

step3 更新距离矩阵 D 和路径矩阵 P :针对每个节点 k ,遍历所有节点 i 和节点 j ,若通过节点 k 能够得到的路径长度比当前记录的路径长度更短,则更新矩阵 D 和路径矩阵 P 。

step4 重复 step3,直到遍历完所有节点 k 。

3.2 多机器人编队模型设计

在编队搬运货物时,队形的稳定性对于保证货物运输的安全性至关重要。虚拟结构编队法(virtual structure)的基本思想是将编队队形视作刚体结构,每个机器人位于虚拟结构的固定顶点。当队形移动时,机器人跟随对应刚体固定点运动,通过控制虚拟结构的位置和方向间接控制机器人的运动。该编队控制方法使得编队队形较为固定,可确保大尺寸货物运输时的稳定安全。因此,针对多机器人协同搬运任务,本文设计了一种基于虚拟结构编队法的三机器人编队模型。

在本文仓储环境下,由于虚拟结构为刚性结构,在规划全局路径时将编队内的多机器人视为整体进行规划,即为虚拟结构中心点规划全局路径,再根据虚拟结构的几何结构为其结构上各顶点的机器人规划路径。图 2 为虚拟结构编队图。

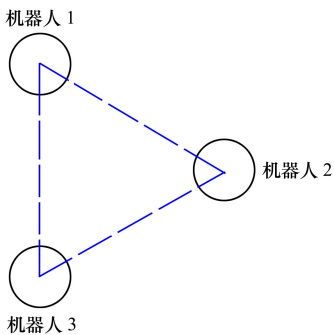


图 2 虚拟结构编队图

设定使用 3 个机器人组成正三角形编队,可得公式(9)。

$$\begin{cases} \sqrt{(x_i - x_{vs})^2 + (y_i - y_{vs})^2} = D_f & i = 1, 2, 3 \\ \arctan 2(y_i - y_{vs}, x_i - x_{vs}) = \theta_i \end{cases} \quad (9)$$

其中虚拟结构中心点表示为 (x_{vs}, y_{vs}) ,参与编队的机器人坐标 (x_i, y_i) , i 表示机器人的索引, D_f 为机器人与虚拟结构中心点的期望距离, θ_i 表示为各机器人相对于虚拟结构中心点的期望角度。

为实现对编队机器人的路径规划,本研究将单任务机器人解决多机器人任务(ST-MR)问题转化为单任务机器人解决单机器人任务(ST-SR)问题,再通过上述 Floyd 算法进行解决。图 3 为路径规划流程图。

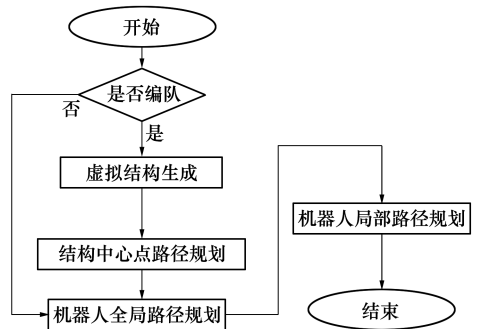


图 3 路径规划流程图

3.3 解决机器人冲突问题的局部路径规划

全局路径规划算法为每个机器人生成了完成当前订单任务的路径,各机器人生成的路径相互独立。由于仓储环境中机器人通道采用了双向通道,机器人遵循通道中单向运动的原则,机器人之间的碰撞冲突大大减少。

在上述基础上,仍然可能存在碰撞情况,可能的碰撞主要有交叉碰撞和追尾碰撞。追尾碰撞现象出现于同向通道,交叉碰撞现象则出现于交叉路口。由于存在单机与编队共存的状态,碰撞还可为单机与单机碰撞、单机与编队碰撞、编队与编队碰撞。6 种碰撞类型如图 4 所示。

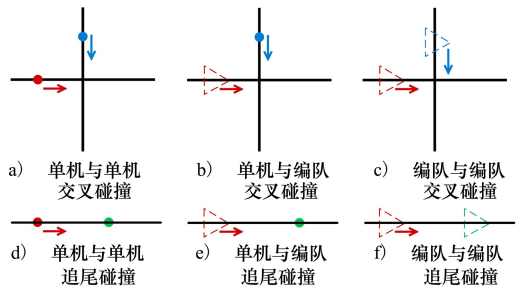


图 4 碰撞示意图

对于机器人 R_i ,其在 t 时刻的位置为 $Q^i(t)$ 。由于单机与单机、单机与编队、编队与编队的安全距离

不同,分别设置对应的安全距离 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 和 ε_3 。该系统中机器人有 3 种任务执行状态,将其用 X 表示。若机器人 R_i 在 t 时刻处于运动状态时 $X_i(t)=1$,处于工作状态时 $X_i(t)=2$,处于停止状态时 $X_i(t)=3$ 。机器人所执行的任务类型用 Y 表示, $Y_i=1$ 表示机器人 R_i 执行单机机器人任务, $Y_i=2$ 表示机器人 R_i 执行多机器人编队任务。机器人 R_i 在 t 时刻的运动方向为 $M_i(t)$, 执行的任务序号为 $D_i(t)$ 。因此关于 3 种追尾碰撞, 单机与单机之间追尾碰撞可定义为

$$\| Q^i(t+1) - Q^j(t) \| < \varepsilon_1 \quad (10)$$

$$\forall R_i, R_j, i \neq j, M_i(t) = M_j(t), Y_i = 1, Y_j = 1$$

单机与多机编队之间追尾碰撞可定义为

$$\| Q^i(t+1) - Q^j(t) \| < \varepsilon_2, \quad (11)$$

$$\forall R_i, R_j, i \neq j, M_i(t) = M_j(t),$$

$$(Y_i = 1, Y_j = 2) \vee (Y_i = 2, Y_j = 1)$$

多机编队与多机编队之间追尾碰撞可定义为

$$\| Q^i(t+1) - Q^j(t) \| < \varepsilon_3, \quad (12)$$

$$\forall R_i, R_j, i \neq j, M_i(t) = M_j(t), Y_i = 2, Y_j = 2,$$

$$D_i(t) \neq D_j(t)$$

参考十字路口的交通规则,将该仓储环境中每个通道交叉处划分成路口外区域与路口内区域。第 w 个路口的路口外区域表示为 O_w 、路口内区域表示为 I_w 。关于 3 种交叉碰撞, 单机与单机之间交叉碰撞可定义为

$$\| Q^i(t+1) - Q^j(t+1) \| < \varepsilon_1, \quad (13)$$

$$\forall R_i, R_j, i \neq j, M_i(t) \neq M_j(t), Y_i = 1, Y_j = 1,$$

$$Q^i(t) \in I_w, Q^j(t) \in I_w$$

单机与多机编队之间交叉碰撞定义为

$$\| Q^i(t+1) - Q^j(t+1) \| < \varepsilon_2, \quad (14)$$

$$\forall R_i, R_j, i \neq j, M_i(t) \neq M_j(t),$$

$$(Y_i = 1, Y_j = 2) \vee (Y_i = 2, Y_j = 1),$$

$$Q^i(t) \in I_w, Q^j(t) \in I_w$$

多机编队与多机编队之间交叉碰撞定义为

$$\| Q^i(t+1) - Q^j(t+1) \| < \varepsilon_3, \quad (15)$$

$$\forall R_i, R_j, i \neq j, M_i(t) \neq M_j(t), Y_i = 2, Y_j = 2,$$

$$D_i(t) \neq D_j(t), Q^i(t) \in I_w, Q^j(t) \in I_w$$

若满足上述碰撞定义,则 $c(i, j) = 1$, 表示机器人 R_i 与机器人 R_j 之间存在碰撞, 否则不存在碰撞。根据上述碰撞设置交通规则, 若 $c(i, j, t + \Delta t) = 1$ 且发生碰撞类型为追尾碰撞, 则令追尾者停止运动进行避让, 被追尾者继续运动, 直到不存在碰撞即 $c(i, j) = 0$ 。若 $c(i, j, t + \Delta t) = 1$ 且发生碰撞类型为

交叉碰撞, 则令机器人 R_i 到达路口外时停止运动, 等待机器人 R_j 离开路口, 直到满足 $c(i, j) = 0$ 。其中 $c(i, j, t + \Delta t) = 1$ 表示机器人 R_i 与机器人 R_j 会在 $t + \Delta t$ 时刻出现碰撞情况。

4 实验结果分析与总结

4.1 实验环境设置

本研究基于 MATLAB 平台进行仿真实验。根据文献[21]研究并参考实际仓储环境,使用栅格法创建仓储环境地图,如图 5 所示。

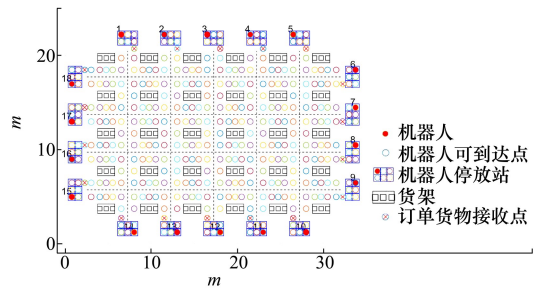


图 5 仓储环境图

该仓储环境中包含货架、机器人、机器人停放站、机器人通道、订单货物接收点。其中,货架 5 行 6 列,共计 30 个,每个货架拥有 3 个取货位。该环境中机器人通道设定为对向双通道,通道中机器人遵循靠右行驶原则。单通道中可容纳 3 个机器人编队通过,避免机器人之间的部分冲突。货架外围共 18 个机器人停放站,每个机器人停放站只有一个出口和入口,能停放 6 个机器人,机器人可在机器人停放站进行停放或充电等工作。环境中共有 18 个机器人,初始时分别停放在 18 个停放站中,每个机器人直径为 0.4 m,设置机器人编队队形为边长 0.4 m 的正三角形。仓储环境划分 6 个区域如图 6 所示。

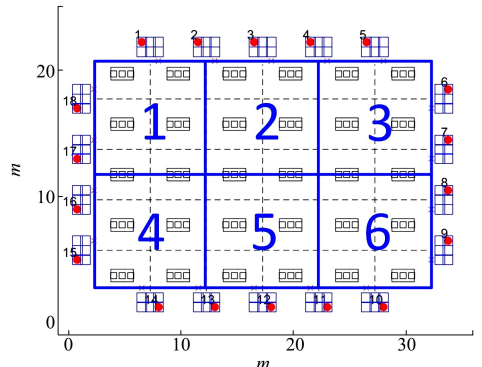


图 6 仓储环境区域划分图

4.2 实验结果与分析

1) 单机与多机编队协同完成仓储任务的实现

本研究在仓储环境下实现了基于拍卖算法的任务分配与基于 Floyd 算法的路径规划多机器人系统。该系统旨在优化机器人在仓储环境中的任务执行效率和协同能力。每个任务具有任务点和目标点,任务点为订单取货地点,目标点为订单货物接收地点,被分配机器人需要前往任务点执行拾取操作并最终将货物搬运至目标点。本研究中设定了 6 个仓储任务,其中有 3 个任务需要编队搬运完成,另外 3 个由单机器人独立完成。具体任务要求如表 1 所示。

表 1 任务组具体要求表

任务序号	是否编队	任务点	目标点
1	是	(19,17) (20.5,10.5)	(6.5,2.75)
2	是	(25.5,14.5) (4,17)	(28,20.75)
3	是	(4,5) (14,16.5) (30.5,5)	(2.25,6.5)
4	否	(29,13) (30.5,13) (29,10.5)	(32.25,5)
5	否	(10.5,13) (10.5,9)	(11.5,2.75)
6	否	(5.5,13) (9,9)	(6.5,2.75)

在仿真实验中,系统成功完成上述混合仓储任务,仿真实验结果如图 7 所示。图中 * 号表示该订单中需要在货架上拾取货物的工作点,五角星表示该订单的货物接收点,不同颜色的虚线分别代表不同机器人的运动路径,清晰地展示了机器人在执行任务过程中的协同方式。

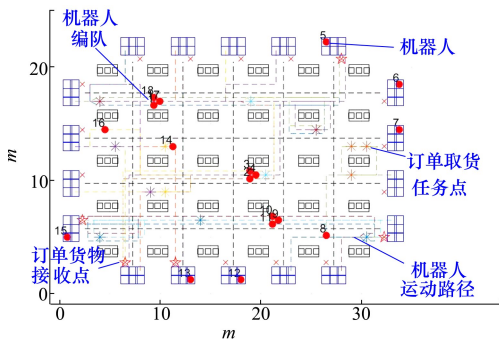


图 7 实验结果图

对于需要多机器人协同的任务,机器人能够通过编队方式共同完成大件货物搬运,体现了系统在

协同作业中的优势。对于单机器人任务,机器人则独立完成指定任务,展示了系统的灵活性和高效性。综上所述,本研究所实现的多机器人系统在仓储环境下能够灵活应对单机任务和多机协同任务,为实际仓储管理中多机器人系统的应用提供了有效的解决方案。

2) 基于交通规则约束优化路径规划的实验结果与分析

根据上述任务组的任务设定,本文设计了 2 组实验评估交通规则约束对机器人路径规划的影响,分别为未加入交通规则约束的情况和加入交通规则约束的情况。实验结果如图 8 所示。

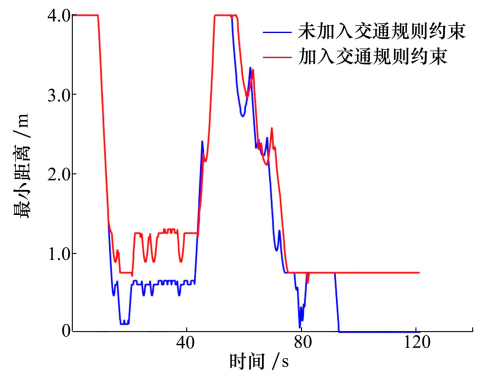


图 8 随时间变化的机器人之间最小距离图

图 8 展示了随时间变化的机器人之间最小距离,蓝色曲线表示未加入交通规则约束的情况,机器人之间的最小距离小于 0.5 m,即机器人之间存在多次碰撞风险。红色曲线表示加入交通规则约束的情况,机器人之间的最小距离始终大于 0.6 m,明显降低了碰撞风险。这是由于机器人在同一通道或交叉路口运动时能够保持一定的安全距离,能够确保各自路径不发生冲突。

通过对比可明显看出,加入交通规则约束后,机器人之间的碰撞情况减少。且在大多时间内,红色曲线明显高于蓝色曲线,表明交通规则约束的效果显著。综合上述实验结果,通过引入交通规则,机器人能够在复杂环境中更安全、更高效地完成任务,显著降低碰撞风险,提高了系统的可靠性。

3) 基于交通流量预测优化任务分配的实验结果与分析

令仓储系统生成 8 个仓储任务,各个任务具体要求如表 2 所示。

表 2 交通流量预测任务组具体要求表

任务序号	是否编队	任务点	目标点
1	是	(4,6.5)	(28,20.75)
2	是	(19.75,9)	(2.25,14.5)
3	否	(14,10.5)	(18,20.75)
4	否	(4.75,14.5)	(2.25,10.5)
5	是	(19,16.5)	(28,20.7)
6	否	(25.5,14.5)	(23,20.75)
7	否	(29.75,10.5)	(32.25,5)
8	是	(20.5,6.5)	(21.5,2.75)

根据前述内容,本文将机器人完成任务总时间对竞价成本的影响权重设定为 0.5,并将机器人运动时间与工作时间的相对重要性权重设定为 0.5。在未加入交通流量影响因子的情况下,上述任务的任务分配结果如表 3 所示。

表 3 未加入交通流量预测的任务分配表

任务名称	被分配机器人名称		
T1	R14	R15	R16
T2	R11	R12	R13
T3	R3		
T4	R1		
T5	R4	R9	R10
T6	R7		
T7	R8		
T8	R2	R5	R6

根据任务分配策略,对于需要 3 个机器人编队完成的任务 T8,将计算得到成本最低的机器人 R5 初步分配给该任务,机器人 R5 完成任务需花费的成本为 69.50。后续将到达编队任务点成本最低的 2 个机器人 R2 和 R6 分配给该任务,机器人 R2 和机器人 R6 到达编队点成本分别为 26.75 与 25.25。在未加入交通流量预测情况下,任务 T8 的完成时间为 88.40 s。根据上述分配方案,多机器人完成任务 T8 的路径如图 9 所示。

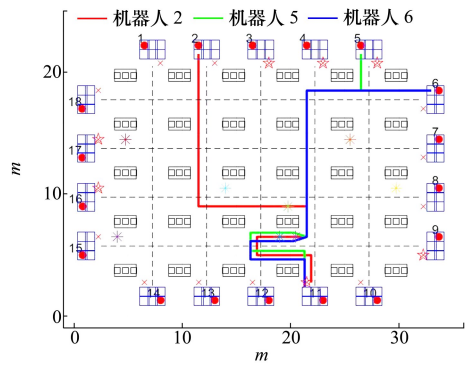


图 9 未加入交通流量影响情况下完成任务 T8 的路径图

为上述实验加入交通流量预测,其他条件不变,其中区域交通流量对竞价成本的影响权重设定为 100,根据任务分配策略,分配结果如表 4 所示。

表 4 加入交通流量预测的任务分配表

任务名称	被分配机器人名称		
T1	R14	R15	R16
T2	R11	R12	R13
T3	R3		
T4	R1		
T5	R4	R9	R10
T6	R7		
T7	R8		
T8	R5	R6	R17

分配任务 T8 时,将成本最低的机器人 R5 初步分配给该任务,该机器人成本为 73.94。由于在分配过程中加入了交通流量影响因子,导致到达编队任务点成本最低的另外 2 个机器人变更为机器人 R6 和机器人 R17,成本分别为 34.14 和 33.81。因此,任务 T8 最终被分配给机器人 R5、R6、R17,3 个机器人完成任务 T8 的路径如图 10 所示。

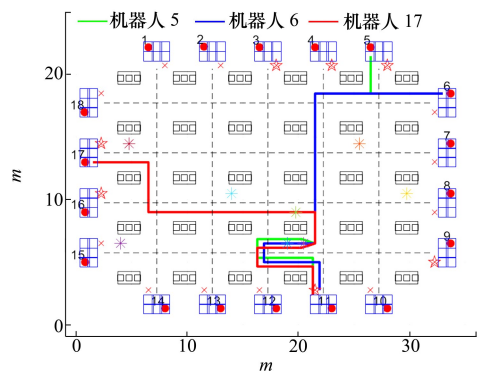


图 10 加入交通流量影响情况下完成任务 T8 的路径图

在上述情况下,任务 T8 完成时间为 87 s,相比于未考虑交通流量影响的情况,减少了 1.4 s。这是由于多机器人系统在分配仓储任务时,综合评估了交通流量,从而最优地选择其他机器人来执行任务,减少任务完成时间。这种任务分配优化使得机器人能够避开拥堵的区域,可有效减少机器人在密集区域的停滞和等待时间,提高作业效率。

4.3 研究工作总结

本研究针对需单机单独完成和多机协同完成的混合仓储运输任务,提出了一种多机器人系统的任务分配与路径规划策略。在任务分配策略方面,基于拍卖算法进行任务分配,并加入交通流量影响因子对拍卖算法进行改进。在路径规划策略方面,加入基于虚拟结构编队法的三机器人编队模型,并提出了 2 层路径规划策略:外层基于 Floyd 算法实现全局路径规划,内层设计避碰规则实现局部路径规划。

在仿真实验中验证了所提出的任务分配与路径规划策略。实验结果表明,系统能够处理 2 种类型的混杂任务,并充分展示了其高效性和灵活性。加入交通规则约束减少了机器人之间的碰撞风险,提高了系统的整体效率和任务完成的安全性。通过引

入交通流量预测对任务分配进行优化,使机器人在执行任务时能够智能避开拥堵区域,避免了机器人在区域内的过度集中造成交通堵塞和停滞等待,显著提高了作业效率。

综上所述,本研究对多机器人系统进行多方面优化,实现了混杂单机与多机编队仓储任务的高效完成,并证明了该系统的实际应用价值,也为未来多机器人系统在仓储管理中的广泛应用提供了坚实的理论和实践基础。

5 结 语

尽管本研究在多机器人任务分配与路径规划方面取得了一定成果,但仍有许多可以进一步研究和改进的地方。例如,可以扩展任务种类,探索更多类型仓储任务的分配与执行策略。另外,当前本研究采用了双通道路网以降低机器人碰撞的可能性,但因此可能造成仓储货物存储量减少。因此,可以针对单通道环境开发更复杂的避碰算法,以平衡货物存储量与系统的安全性之间关系。此外,还可深入研究如何在更复杂的仓储环境下优化机器人协作,提高系统的灵活性与适应性。

参考文献:

- [1] YAMASHITA A, ARAI T, OTA J, et al. Motion planning of multiple mobile robots for cooperative manipulation and transportation[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2003, 19(2): 223-237
- [2] JOSE K, PRATHIHAR D K. Task allocation and collision-free path planning of centralized multi-robots system for industrial plant inspection using heuristic methods[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2016, 80: 34-42
- [3] 郭浩. 智能仓储改善仓储物流[J]. 中国储运, 2017(3): 71
GUO Hao. Intelligent warehousing improves warehousing logistics[J]. China Storage & Transport, 2017(3): 71 (in Chinese)
- [4] ENRIGHT J J, WURMAN P R. Optimization and coordinated autonomy in mobile fulfillment systems[C] // Workshops at the twenty-fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2011: 33-38
- [5] 罗雪冬. 面向智能仓储的多机器人路径规划及调度[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2022
LUO Xuedong. Multi-robot path planning and scheduling for intelligent warehouse[D]. Chongqing: Chongqing Post and Communications University, 2022 (in Chinese)
- [6] GERKEY P, MATARID J. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems[J]. The International Journal of Robotics Research, 2004, 23(9): 939-954
- [7] SKALTSIS G M, SHIN H S, TSOUDOS A. A survey of task allocation techniques in MAS[C] // 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, 2021: 488-497
- [8] 刘淑华, 张崧, 吴洪岩, 等. 基于群体智能的多机器人任务分配[J]. 吉林大学学报, 2010, 40(1): 123-129
LIU Shuhua, ZHANG Yu, WU Hongyan, et al. Multi-robot task allocation based on swarm intelligence[J]. Journal of Jilin University, 2010, 40(1): 123-129 (in Chinese)
- [9] 张子迎, 陈云飞, 王宇华, 等. 基于启发式深度 Q 学习的多机器人任务分配算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(6): 857-864

- ZHANG Ziyin, CHEN Yunfei, WANG Yuhua, et al. Multi-robot task allocation algorithm based on heuristically accelerated deep Q network[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(6): 857-864 (in Chinese)
- [10] SULLIVAN N, GRAINGER S, CAZZOLATO B. Sequential single-item auction improvements for heterogeneous multi-robot routing[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2019, 115(8): 130-142
- [11] ALMADHOUN R, TAHA T, SENEVIRATNE L, et al. A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(8): 1-24
- [12] ALSHAMMREI S, BOUBAKER S, KOLSI L. Improved Dijkstra algorithm for mobile robot path planning and obstacle avoidance [J]. *Computers, Materials and Continua*, 2022, 72: 5939-5954
- [13] QI J, YANG H, SUN H. MOD-RRT*: a sampling-based algorithm for robot path planning in dynamic environment[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2020, 68(8): 7244-7251
- [14] 王靖东. 基于优化 Floyd 算法的室内机器人路径规划研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2015
WANG Jingdong. Path planning for an indoor robot with optimized floyd algorithm-based[D]. Xi'an: Northwest Agriculture and Forestry University, 2015 (in Chinese)
- [15] OH K K, PARK M C, AHN H S. A survey of multi-agent formation control[J]. *Automatica*, 2015, 53: 424-440
- [16] HAN T, GUAN Z H, CHI M, et al. Multi-formation control of nonlinear leader-following multi-agent systems[J]. *ISA Transactions*, 2017, 69: 140-147
- [17] LEE G, CHWA D. Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2018, 11: 127-138
- [18] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. *Autonomous Robots*, 1997, 4(4): 387-403
- [19] 张中伟, 高增恩, 王菁锐, 等. 分布式 AGV 调度研究综述与发展趋势分析[J]. *制造技术与机床*, 2024, 74(5): 1-10
ZHANG Zhongwei, GAO Zengen, WANG Jingrui, et al. Review and development trend analysis of distributed AGV scheduling [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2024, 74(5): 1-10 (in Chinese)
- [20] SHI Y, HU B, HUANG R. Task allocation and path planning of many robots with motion uncertainty in a warehouse environment [C]//*IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics*, 2021: 776-781
- [21] RYU K, DANTANARAYANA L, FURUKAWA T, et al. Grid-based scan-to-map matching for accurate 2D map building[J]. *Advanced Robotics*, 2016, 30(7): 431-448

Task allocation and path planning for multi-robot systems in intelligent warehousing

CHU Jing¹, TIAN Yiqiu¹, YUE Qi¹, HUANG Yong²

(1.School of Automation, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;)
(2.School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Faced with today's increasingly complex market demands, traditional manual warehouse systems are becoming inadequate, necessitating the urgent intelligent transformation and upgrading of warehouse systems. In this context, this paper aims to design a task allocation and path planning strategy for a multi-robot warehouse system to efficiently accomplish mixed single-robot and multi-robot types of warehouse tasks. The study proposes a warehouse task allocation strategy that incorporates traffic flow impact factors into the auction algorithm, optimizing task allocation by predicting robot density in various areas of the environment. For multi-robot formation tasks, a three-robot formation model based on the virtual structure method is designed. Additionally, a two-layer path planning strategy is proposed: the outer layer conducts global path planning based on the Floyd algorithm, while the inner layer resolves various collision issues through traffic rule constraints, achieving local optimal path planning. Simulation experiments conducted on the MATLAB platform show that the multi-robot system can flexibly handle mixed types of warehouse tasks, effectively reducing collision risks between robots and stagnation in dense areas, thereby improving the safety and efficiency of the multi-robot system. This study provides a reference for future research and practical applications of multi-robot systems.

Keywords: warehousing system; multi-robot system; task allocation; path planning; multi-robot collaboration

引用格式: 褚晶, 田艺秋, 岳颀, 等. 面向智能仓储的多机器人任务分配及路径规划[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(5): 929-938

CHU Jing, TIAN Yiqiu, YUE Qi, et al. Task allocation and path planning for multi-robot systems in intelligent warehousing [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(5): 929-938 (in Chinese)